

基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量 月度数据集 (2003–2018)

谢富泰^{1,2}, 周翔^{1*}, 陶醉¹, 吕婷婷¹, 王锦¹, 李若溪^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100012;

2. 中国科学院大学电子与通信工程学院, 北京 101408

摘要: 研究海洋真光层底部颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 通量, 对于理解、评估海洋有机碳泵和海洋碳循环等具有重要意义。POC 是其输出比 e-ratio 与净初级生产力 (Net Primary Production, NPP) 的乘积。本文首先利用 POC 实测数据及不同的 NPP 产品, 评估了 7 种经典 e-ratio 估算模型的准确性, 进而选用 Dunne 等 (2005a) 建立的估算模型, 联合 2003–2018 年每月的 9 km 分辨率的 MODIS 海面温度 (SST)、叶绿素浓度 (Chl) 和真光层深度 (Zeu) 数据, 计算得到 POC 输出比 e-ratio。在此基础上, 采用陶醉等 (2019) 发布的海洋 NPP 数据, 研发了基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018)。本数据集为月度数据, 空间分辨率为 9 km, 每个数据文件包括两个参数: poc_flux 和 pe_ratio, 前者为 POC, 后者为 e-ratio。数据集存储为.hdf 格式, 由 192 个数据文件组成, 数据量为 13.3 GB (压缩为 16 个文件, 4.48 GB)。

关键词: 全球海洋; 颗粒有机碳通量; 月度数据; 2003–2018

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.02>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.02.V1>.

1 前言

海洋中碳从表层到深海的传输主要包括物理学和生物学两个过程, 其中生物学的过程被称为海洋生物碳泵 (Biological Carbon Pump, BCP) [1]。BCP 不仅对全球大气 CO₂ 含量具有重要的调节作用, 也是全球碳循环研究的重要指标 [2]。海洋真光层底颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 通量直接反映了 BCP 的效率 [3], 因此研究 BCP 的最重要的方法之一是测量 POC 通量。传统的测量 POC 通量的方法包括沉积物捕集法 [4], 放射性同位素 ²³⁴Th 衰变法 [5], 但高昂的成本和复杂的仪器操作使这类方法无法获取全球范围长时间的 POC 通量观测数据。此外, 还有一些估算 POC 通量的生态系统模型和全球系统模型 [6,7], 这些模型在研究 POC 通量的传输机理方面做出了重要贡献。但获取全球范围内

收稿日期: 2020-12-23; 修订日期: 2021-03-01; 出版日期: 2021-03-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2018YFE0124200)

*通讯作者: 周翔 L-7359-2016, 中科院空天信息创新研究院, zhouxiang@radi.ac.cn

数据引用方式: [1] 谢富泰, 周翔, 陶醉等. 基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018) [J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(1): 11–18. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.02>.
[2] 谢富泰, 周翔, 陶醉等. 基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.02.V1>.

连续的 POC 通量仿真数据,需要大量的原位测量数据和辅助数据作为输入,且这些数据都不易获取。遥感卫星重访周期短,观测范围广,可以实现对全球海洋的连续观测。研究表明,海洋真光层底 POC 输出通量与净初级生产力(Net Primary Production, NPP)的比值和“净生产力”与“总生产力”的比值近似^[8,9]。这将 POC 通量与 NPP 直接联系起来,也为遥感估算 POC 通量提供了可能。

基于海面温度、叶绿素浓度、真光层深度等遥感数据,研究人员开发了一系列估算 POC 输出比 e-ratio 的模型^[9-13],用于计算全球海洋的 POC 通量。但目前关于 POC 通量时空变化的研究大多集中在印度洋,南洋和太平洋等局部海域,而对全球范围,长时间序列 POC 通量的分析是不足的。为了提供长时间序列全球海洋 POC 通量研究的基础数据,本文开发了 2003–2018 年全球海洋真光层底部 POC 通量月度数据集。本文首先利用实测的 POC 通量数据和不同的 NPP 产品评估了几种经典的 POC 通量估算模型的性能,然后选择最优的估算方法,结合 MODIS 和 NPP 的产品数据,计算得到全球海洋 POC 通量。

2 数据集元数据简介

《基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018)》^[14]的元数据简介见表 1。

表 1 《基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018)》元数据简表

条目	描述		
数据集名称	基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018)		
数据集短名	GlobalMarinePOC		
作者信息	谢富泰 ABH-7123-2020, 中科院空天信息创新研究院, xieft@radi.ac.cn 周翔 L-7359-2016, 中科院空天信息创新研究院, zhouxiang@radi.ac.cn 陶醉 L-4530-2016, 中科院空天信息创新研究院, taozui@radi.ac.cn 吕婷婷 R-8978-2016, 中科院空天信息创新研究院, lvt@radi.ac.cn 王锦 ABH-9051-2020, 中科院空天信息创新研究院, wangjin01@radi.ac.cn 李若溪 ABH-7136-2020, 中科院空天信息创新研究院, liruoxi19@mails.ucas.ac.cn		
地理区域	全球海洋	数据年代	2003–2018
时间分辨率	月	空间分辨率	9 km
数据格式	.hdf	数据量	4.48 GB
数据集组成	192 个数据文件 (压缩为 16 个文件)		
基金项目	中华人民共和国科学技术部 (2018YFE0124200); 中国科学院国际合作局 (2020)		
数据计算环境	MATLAB		
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn		
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所		
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3)增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[15]		
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref		

3 数据研发方法

3.1 数据源

数据源包含遥感数据和实测数据两部分。遥感数据包括 MODIS 海面温度 (Sea Surface Temperature, SST), 叶绿素浓度 (Chlorophyll, Chl) 和真光层深度 (Euphotic Zone Depth, Zeu) 的产品数据, 以及基于 VGPM^[16], CbPM^[17]和 SAbPM^[18]三种模型生产的 NPP 数据。所有数据都是 2003 年 1 月至 2018 年 12 月空间分辨率为 9 km 的全球海洋月均数据。实测数据包括夏威夷站 (HOT)、百慕大站 (BATS)、波弗特海和东海实测的 POC 通量数据^[19–21]。从 2003 年到 2016 年, 在不同水深处共收集到 285 个 POC 通量实测数据, 经过数据预处理和卫星同步匹配, 共计使用 230 个实测数据作为验证数据集, 占总实测数据的 80.7%。

3.2 算法原理

POC 通量等于 POC 输出比 (e-ratio) 和 NPP 的乘积, 因而 e-ratio 估算模型和 NPP 产品的精度都会对 POC 通量估算结果的准确性造成影响。本文首先利用 POC 通量实测数据和三种不同的 NPP 产品对表 2 中 7 种经典的 e-ratio 估算模型的精度进行评价。由于实测的 POC 通量数据测自于不同水深, 而模型计算得到的是海洋真光层底的 POC 通量, 两者不能直接对比。本文首先利用经典的 POC 通量垂直迁移公式^[22]将所有的 POC 通量转换到水深 150 m 处 (大量实测数据来源于该水深位置), 然后进行对比, 并用对数偏差 (Bias), 对数均方根误差 (RMSD), 决定系数 (R^2) 和平均相对误差 (r.e)^[23]对结果进行评价。

POC 通量的垂直迁移公式如式(1)所示, 其中 POC(z)和 POC(z_0)分别是水深 z 和 z_0 处的 POC 通量。

$$\text{POC}(z) = \text{POC}(z_0) \times \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-0.858} \tag{1}$$

表 2 列举了 7 种经典的 e-ratio 的估算模型, 其中 Chl_{tot} 是海洋真光层叶绿素浓度的积分数据。

表 2 7 种经典的 POC 输出比 (e-ratio) 估算模型

作者	模型表达式
Baines (1994)	$e - \text{ratio} = 10^{-0.67 + 0.30 \times \log_{10}(\text{Chl}_{\text{tot}} / \text{Zeu})}$
Laws (2000)	$e - \text{ratio} = 0.62 - (0.02 \times \text{SST})$
Dunne (2005a)	$e - \text{ratio} = \max(0.04, \min(0.72, -0.0081 \times \text{SST} + 0.0668 \times \ln(\text{Chl} / \text{Zeu}) + 0.426))$
Dunne (2005b)	$e - \text{ratio} = \max(0.04, \min(0.72, -0.0101 \times \text{SST} + 0.0582 \times \ln(\text{NPP} / \text{Zeu}) + 0.419))$
Henson (2011)	$e - \text{ratio} = 0.23 \times e^{(-0.08 \times \text{SST})}$
Laws (2011a)	$e - \text{ratio} = ((0.5857 - 0.0165 \times \text{SST}) \times \text{NPP}) / (51.7 + \text{NPP})$
Laws (2011b)	$e - \text{ratio} = 0.04756 \times (0.78 - (0.43 \times \text{SST}) / 30) \times \text{NPP}^{0.307}$

经过对比, 本文发现利用 Dunne (2005a)模型的 e-ratio 和 SAbPM 模型的 NPP 数据计算得到的 POC 通量数据具有最高的准确度和稳定性。在此基础上, 本文利用 MODIS 的 SST, Chl 和 Zeu 产品计算得到 e-ratio 数据, 然后结合陶醇等人发表的 NPP 数据^[24], 根据式(2)计算得到全球海洋真光层底的 POC 通量数据。

$$\text{POC flux} = e - \text{ratio} \times \text{NPP} \tag{2}$$

3.3 技术路线

数据集研发的技术路线如图 1 所示。首先利用 2003–2018 年 MODIS 产品数据和不同 NPP 产品数据根据表 2 中 e-ratio 的计算公式计算出 POC 通量的输出比，然后乘以 NPP 数据得到真光层底的 POC 通量估算数据。利用式(1)中的 POC 通量垂直迁移公式将 POC 通量估算数据和实测数据统一转换到水深 150 m 处进行对比分析，并用 3.2 中的评价指标衡量模型计算的准确性和稳定性。最后选定最优的估算 POC 通量的方法，即由 Dunne (2005a) 模型估算的 e-ratio 和由 SAbPM 模型反演的 NPP 数据的组合，输入 2003–2018 年 MODIS 的产品数据和 NPP 数据，由式(2)计算得到基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018)。

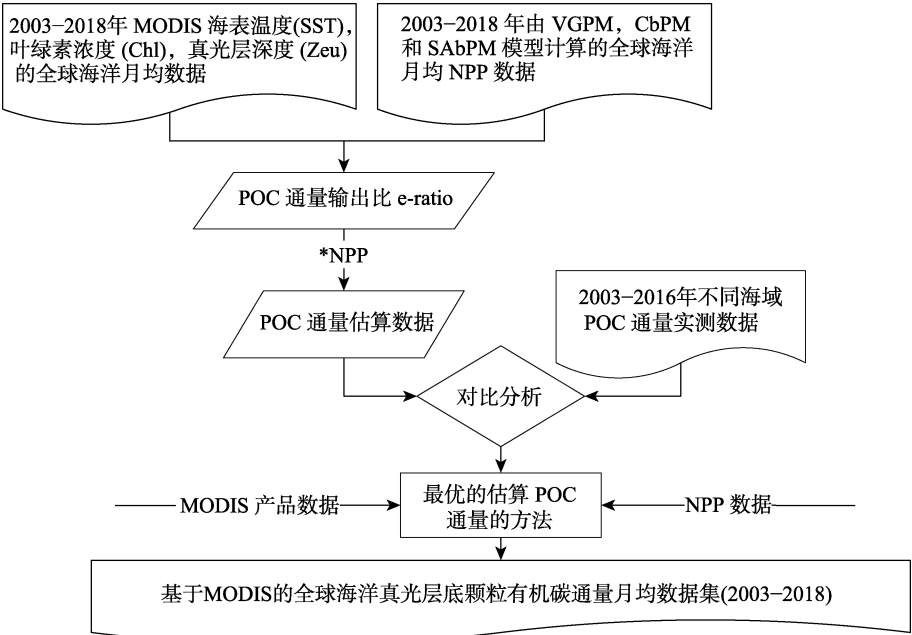


图 1 数据研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集为月均数据，2003–2018 年共计 192 个月度数据文件。每个数据文件包括两个参数：poc_flux 和 pe_ratio，前者为 POC 通量，后者为 POC 输出比 e-ratio，其中 POC 的单位是 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ，而 e-ratio 无单位。数据存储格式为.hdf，空间分辨率为 9 km，数据量为 13.3 GB。数据按年份压缩为.zip 格式，即从 2003–2018 年共有 16 个压缩文件，数据量为 4.48 GB。

4.2 数据结果

由图 2 可以看出，全球 POC 通量在不同地区具有不同的分布特征。在南北纬 30° 之间，大部分海域的 POC 通量低于 $100 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ，而在高纬度地区 POC 通量最高可超过 600

$\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 。其次，近岸海域的 POC 通量远高于深海海域的 POC 通量，其中近岸海域是指水深小于 2,000 m 的海域，而深海海域指水深大于 2,000 m 的海域。为进一步凸显 POC 通量的空间分布，我们统计了 2003–2018 年间全球海洋真光层底 POC 通量的年均数据，并对不同纬度和远近岸海域的 POC 通量占总通量的比重进行计算，结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，POC 通量年平均总量为 $11 \text{ PgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。其中 $0\text{--}30^\circ$ 低纬度海域的 POC 通量占总量的 28.7%， $30\text{--}60^\circ$ 中纬度海域的 POC 通量占总量的 61%。原因在于低纬度海域的 POC 输出比 e-ratio 普遍较低，仅为 10% 左右，而中高纬度海域 e-ratio 平均值能够达到 30% 以上，部分大陆架附近海域甚至高于 50%。在 $60\text{--}90^\circ$ 高纬度海域，海洋面积小，且南北极存在冰冻期，因此 POC 通量仅占总量的 10.3%。此外，深海海域的 POC 通量占总量的 70.5%，近岸海域 POC 通量占 29.5%。虽然近岸海域的面积大约为 $4.8\times 10^7 \text{ km}^2$ ，仅为全世界海域面积的 1/7，但由于大陆架附近较高的 e-ratio 值，近岸海域的 POC 通量占比接近 1/3。因此，近岸海域的 POC 通量是海洋碳循环中不容忽视的重要部分，值得我们做更多的研究。

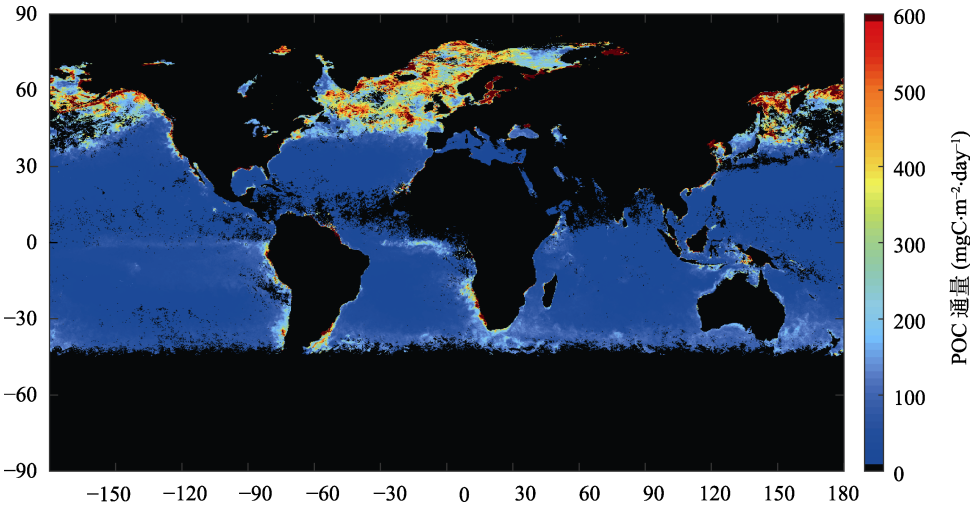


图 2 全球海洋真光层底 POC 通量月均数据可视化图（以 2015 年 6 月为例）

由图 3 可以看出，从 2003 年到 2018 年全球海洋真光层底的颗粒有机碳通量整体呈下降趋势。此外，我们分别统计分析了 $0\text{--}30^\circ$ 、 $30\text{--}60^\circ$ 、 $60\text{--}90^\circ$ 不同纬度海域 POC 通量时间尺度的变化规律，发现在低纬度和中纬度海域，POC 通量年均总量也逐年下降，且在低纬度海域下降速率更快。而在高纬度海域，POC 通量年均总量却呈现出逐年递增的趋势，全球气候变暖导致两极地区开阔水域的面积不断增大，POC 输出量也在不断地增多。

表 3 不同纬度/海洋区域 POC 通量的分布比例统计表

区域	POC 通量分布
$0\text{--}30^\circ$	28.70%
$30\text{--}60^\circ$	61.00%
$60\text{--}90^\circ$	10.30%
近岸海域	29.50%
深海海域	70.50%

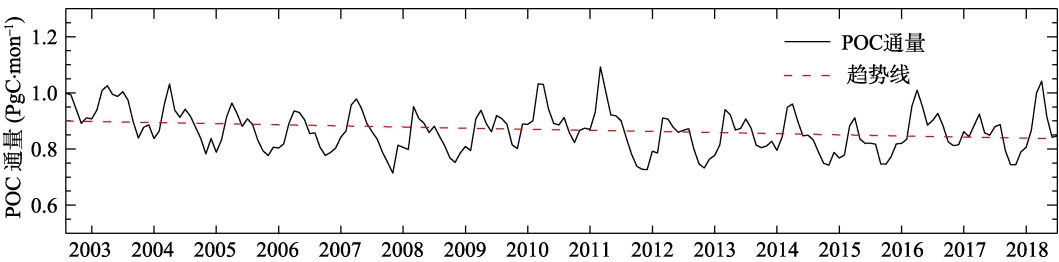


图 3 2003–2018 年全球月均 POC 通量的变化曲线图

4.3 数据结果验证

相比于利用其他 e-ratio 模型和 NPP 产品计算的 POC 通量数据，利用 Dunne (2005a) 中的 e-ratio 模型和基于 SAbPM 模型反演的 NPP 计算得到的全球海洋真光层底 POC 通量估算结果具有最高的精度和稳定性，其中 Bias 仅为-0.01，RMSD 为 0.17， R^2 为 0.50，re 为 30%。利用不同 e-ratio 模型和 NPP 产品估算的 POC 通量与实测数据的详细对比结果可在 Xie (2019) [25]中找到，这里不作赘述。此外，本文计算得到 2003–2018 年全球海洋年平均 POC 通量大约为 $11 \text{ PgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ，考虑到数据的平均相对误差和部分极地区域数据的缺失，本数据集计算得到年平均 POC 通量在 $8.5\text{--}14.3 \text{ PgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 之间，这一结果与大部分研究人员的估算结果非常接近[12, 26,27]，进一步证明本文的 POC 通量数据是可靠的。

夏威夷站点和百慕大站点的 POC 通量均为 2003–2016 年长时间序列的观测数据，其时间尺度的变化规律能够很好地反应 POC 通量的变化趋势。图 4 是这两个站点 POC 通量数据的散点图，从图中的趋势线及其表达式的系数中可以看出，2003–2016 年，POC 通量总体上呈现逐年减少的趋势，这与本文估算的 POC 通量在时间尺度上变化趋势一致，证明本文估算的 POC 通量数据能够很好地反应全球海洋 POC 通量的变化。

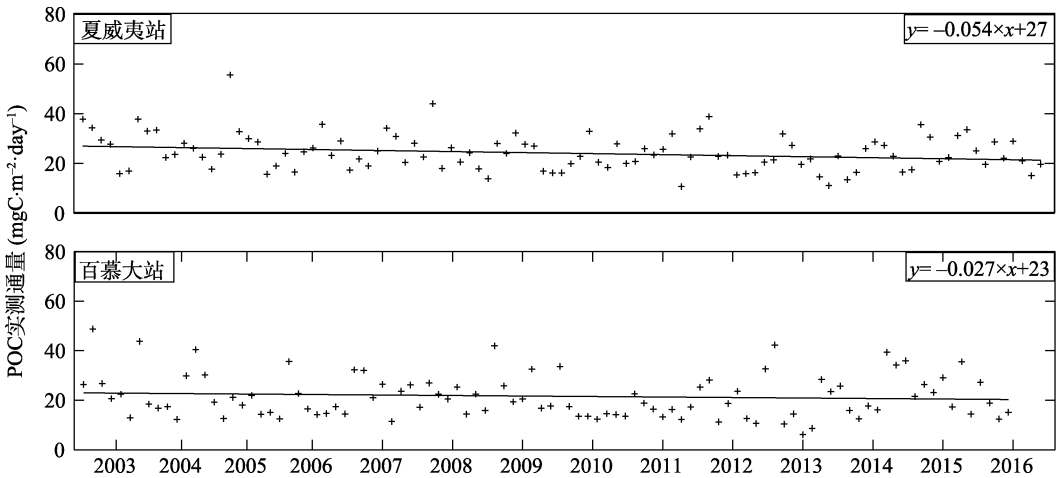


图 4 2003–2016 年夏威夷站 (HOT) 和百慕大站 (BATS) 实测 POC 通量数据变化趋势图

5 讨论和总结

POC 通量能够反应 BCP 的效率, 这关系到大气中 CO_2 含量的调节和海洋中碳循环和碳平衡问题, 因此 POC 通量的时空变化是科学家们重点关注的热点问题。本文基于 Dunne (2005a) 的 e-ratio 估算模型和陶醉等人提供的 NPP 数据, 研发了基于 MODIS 的全球海洋真光层底 POC 通量月度数据集 (2003–2018)。

本文用于验证估算结果的 POC 通量实测数据是来自于赤道太平洋长时间序列观测站点夏威夷站和百慕大站的观测数据, 以及东海和波弗特海的部分观测数据。观测区域覆盖低、中、高纬度海域, 值域范围涵盖高、低值区间, 对全球海洋 POC 通量具有较好的代表性。经与实测的 POC 通量数据对比验证, 利用 Dunne (2005a) e-ratio 模型和基于 SAbPM 模型生产的 NPP 数据计算得到的 POC 通量精度最高, 且稳定性最好。进一步地, 本文对 2003–2018 年全球海洋月均 POC 通量的变化进行分析, 得出其呈逐年降低的变化趋势, 这与 POC 通量实测数据的变化趋势一致。

综上, 本文研发的基于 MODIS 的全球海洋真光层底 POC 通量月度数据集, 提供了全球范围 POC 通量长时间序列的基础数据, 可用于全球海洋 POC 通量的空间分布及其时间尺度的变化规律研究。

作者分工: 周翔、陶醉对数据集的开发做了总体设计; 谢富泰、陶醉采集和处理了 MODIS 数据, POC 通量实测数据和 NPP 数据; 谢富泰做了数据分析和验证工作; 所有作者共同撰写和修改了数据论文等。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Falkowski, P. G., Barber, R. T., Smetacek, V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production [J]. *Science*, 1998, 281(5374): 200–206.
- [2] Lima, I. D., Lam, P. J., Doney, S. C. Dynamics of particulate organic carbon flux in a global ocean model [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(4): 1177–1198.
- [3] Ducklow, H. W., Steinberg, D. K., Buesseker, K. O. Upper ocean carbon export and the biological pump [J]. *Oceanography*, 2001, 14(4): 50–58.
- [4] Gardner, W. Sediment Trap Sampling in Surface Waters [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] Loeff, D., Van, M. R., Pinghe, H., *et al.* ^{234}Th in surface waters: distribution of particle export flux across the Antarctic Circumpolar Current and in the Weddell Sea during the GEOTRACES expedition ZERO and DRAKE [J]. *Deep Sea Research*, 2011, 58(25): 2749–2766.
- [6] Gloege, L., Mckinley, G. A., Mouw, C. B., *et al.* Global evaluation of particulate organic carbon flux parameterizations and implications for atmospheric pCO_2 : evaluating POC flux parameterizations [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(7): 1192–1215.
- [7] Buesseler, K. O., Boyd, P. W. Shedding light on processes that control particle export and flux attenuation in the twilight zone of the open ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(4): 1210–1232.
- [8] Dugdale, R. C., Georing, J. J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity [J]. *Limnology & Oceanography*, 1967, 12(2): 196–206.

- [9] Baines, S. B., Karl, P. D. M. Why does the relationship between sinking flux and planktonic primary production differ between lakes and oceans [J]? *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 213–226.
- [10] Laws, E. A., Falkowski, P. G., Smith, W. O., *et al.* Temperature effects on export production in the open ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(4): 1231–1246.
- [11] Dunne, J. P., Armstrong, R. A., Gnanadesikan, A., *et al.* Empirical and mechanistic models for the particle export ratio [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB4026.
- [12] Henson, S. A., Sanders, R., Madsen, E., *et al.* A reduced estimate of the strength of the ocean's biological carbon pump [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(4): L04606.
- [13] Laws, E. A., D'Sa, E., Naik, P., *et al.* Simple equations to estimate ratios of new or export production to total production from satellite-derived estimates of sea surface temperature and primary production [J]. *Limnology and Oceanography Methods*, 2011, 9(12): 593–601.
- [14] 谢富泰, 周翔, 陶醉等. 基于 MODIS 的全球海洋真光层底颗粒有机碳通量月度数据集 (2003–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.02.V1>.
- [15] 全球变化科学研究数据出版系. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [16] Behrenfeld, M. J., Falkowski, P. G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models [J]. *Limnology & Oceanography*, 1997, 42(7): 1479–1491.
- [17] Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., *et al.* Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1006.
- [18] Tao, Z., Wang, Y., Ma, S., *et al.* A phytoplankton class-specific marine primary productivity model using MODIS data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5519–5528.
- [19] Hung, C. C., Tseng, C. W., Gong, G. C., *et al.* Fluxes of particulate organic carbon in the East China Sea in summer [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6469–6484.
- [20] Hung, C. C., Chen, Y. F., Hsu, S. C., *et al.* Using rare earth elements to constrain particulate organic carbon flux in the East China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33880.
- [21] Sallon, A., Michel, C., Gosselin, M. Summertime primary production and carbon export in the southeastern Beaufort Sea during the low ice year of 2008 [J]. *Polar Biology*, 2011, 34(12): 1989–2005.
- [22] Martin, J. H., Knauer, G. A., Karl, D. M., *et al.* VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific [J]. *Deep Sea Research*, 1987, 34(2): 267–285.
- [23] Friedrichs, M., Carr, M., Barber, R., *et al.* Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76(1): 113–133.
- [24] 陶醉, 周翔, 谢富泰等. 基于 MODIS 和 SABPM 模型的全球月度海洋初级生产力数据集 (自 2003 年起) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2019. <https://doi.org/10.3974/geodb.2019.05.01.V1>.
- [25] Xie, F., Tao, Z., Zhou, X., *et al.* Spatial and temporal variations of Particulate organic carbon sinking flux in global ocean from 2003 to 2018 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2941.
- [26] Bopp, L., Monfray, P., Aumont, O., *et al.* Potential impact of climate change on marine export production [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 81–99.
- [27] Henson, S. A., Yool, A., Sanders, R. Variability in efficiency of particulate organic carbon export: a model study [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(1): 33–45.